

복합촉매를 이용한 플라즈마 반응에 의한 유해가스의 제거에 관한 연구

박 화 용* · 김 관 중* · 우 인 성*
*인천대학교 안전공학과

A study of decomposition of harmful gases using Composite catalyst by Photocatalytic plasma reactions

Hwa-Young Park* · Kwan-Jung Kim* · In-Sung Woo*

*Department of Safety Engineering Graduate School. University of Incheon

Abstract

The objective of this study is to maintain the same frequency as the electrode material, concentration, duration of decomposition efficiency, power consumption and voltage measurements using a composite catalyst according to the change of process parameters to obtain the optimum state of the process and the maximum decomposition efficiency. In this paper, known as a major cause of air pollution, such as NO, NO₂, SO₂, frequency, flow rate, concentration, the material of the electrodes, and using TiO₂ catalyst reactor with surface discharge caused by discharging the reactor plasma NO_x, SO_x decompose the harmful gas want to remove.

Keyword : catalysis reactor, spcp reactor, hamful gas

1. 서 론

최근 산업이 발전함에 따라 국내 에너지 수요가 크게 증가하고 있으며 많은 부분을 화석연료의 연소에 의한 발전에 의존하고 있다. 대기로 방출되는 질소산화물은 산성비 및 도심스모그의 주범이 되며, 그 미치는 파장이 사회적으로 매우 크다. 이에 따라 세계 각국의 환경규제는 날로 강하게 제기되면서 대류권 내에서 진행되는 광화학적 대기오염 현상과 그에 따른 오존농도의 증가에 대해 많은 관심이 집중되고 있다. 광화학적 대기오염현상이란 대기중의 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds : VOCs)과 질소산화물(NO_x)이 햇빛 내의 자외선에 의해 반응하면 오존, 알데히드, peroxyacetyl nitrate 등과 같은 2차 오염물질인 광화학 산화물을 생성하는 것을 의미하는데 이 광화학 산화물

은 생물체에 악영향을 주고 아울러 성층권의 오존층을 파괴하여 궁극적으로 지구 온난화 현상의 원인이 되고 있다. 연소 배기 가스중 유해가스를 제거하는 방법은 촉매법, 산화환원법 등의 재래적인 방법이 사용되어 왔으나 이러한 방식은 화학시약과 에너지 등의 운전비용이 높은 단점 때문에 신기술의 개발이 요구되어 왔고 그 중의 하나가 저온 플라즈마 기술이다. Vogtlin 와 Penetrante에 의하면 전자빔법이 고에너지 전자를 생성하여 분해율이나 에너지 소모 측면에서도 더 좋은 방법으로 제시하고 있으나 X-ray 발생으로 인한 2차 오염의 단점이 있고, 전기방전법은 종류면에서 구분해보면 Oda와 Masuda 등은 연면방전(Surface Induced Plasma Chemical Processing, SPCP) 방식에 의한 아세톤 같은 유기용제의 제거에 대해 연구하였으며

† Acknowledgement: This work is completed by fund of University of Incheon. in 2012.

† Corresponding Author: Kwan-Jung Kim, 12-1 Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon, Korea.

M · P: 010-5553-1713, E-mail: no1kkj@nate.com

Received January 19, 2013; Revision Received March 6, 2013; Accepted March 18, 2013.

Mizuno 등은 Ferro electric packed bed corona 방전을 이용하여 SOx, NOx 제거에 대한 방향을 제시하였다. Dinelli 과 Civitano 등은 Pulsed corona 방전을 이용하여 화력발전소에서 나오는 배기가스 제거에 대한 연구를 하였다. 또한 Shimizu와 Oda 등에 의해 단일 방전에 의한 실험보다는 전기방전과 함께 촉매를 이용한 다단계 첨가제를 사용하는 방법도 시도되고 있다. 그리고 박성국 등은 TiO2 같은 광촉매와 플라즈마 방전 반응을 연결한 연구결과 처리 효율이 5% 이상 상승함을 보였다. 변영철 등은 분말 NaClO2(S)를 이용하여 NO를 NO2로 산화시킨 후 탄소분산형 촉매를 이용하여 저온의 NO2와 SO2 gas를 동시제거에 관한 실험에서 제철소 소결공장에서 나오는 가스를 bench 규모 실험을 하였고, 황승권 등은 LNT(Lean Nox Trap) 촉매를 이용하여 승용디젤엔진의 연료 분사 제어를 통한 NOx의 저감 특성에 관한 연구를 하였으나, 촉매의 종류에 따른 NOx의 저감 특성에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 연소 후에 발생하는 질소산화물을 복합촉매 반응기와 연면방전 반응기를 방전시켜 발생하는 Plasma 반응에 의하여 분해제거율을 구하고 생성물의 분석을 통하여 최적의 공정변수와 최고의 분해제거율을 얻고자 하는 것이다. 따라서 대기환경오염의 주원인으로 알려진 일산화질소(NO), 이산화질소(NO2), 이산화황(SO2) 등을 주파수, 유량, 농도, 전극의 재질(W, Cu, Al), 전극의 굵기(1, 2, 3mm), 감은 횟수(7, 9, 11 회), 기준가스(N2, O2, air), 모의가스(CO2) 그리고 촉매 반응기(catalysis reactor)와 연면방전 반응기(SPCP reactor)를 방전시켜 발생하는 Plasma를 이용하여 NOx 유해가스를 분해 제거 하고자 하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치

본 실험은 2가지 형태로 구분하여 분해실험을 하였다. 즉, 산화칼슘(Calcium Oxide, CaO)의 촉매 반응기(catalysis reactor)를 첨가하지 않은 상태에서의 유해가스 분해실험을 먼저 하였으며, 그 가스분해제거 분석결과를 가지고 산화칼슘 촉매 반응기(catalysis reactor)를 첨가하여 분해실험을 하였을 때의 유해가스 분해제거율을 비교분석 하였다.

본 연구에서 사용한 촉매 반응기는 Fig. 9, 10에서 보는 바와 같이 유효길이 150 mm, 안쪽직경 10 mm의 테프론 관을 사용하여 99.9% CaO, CuO, TiO2 catalysis reactor를 충전하여 SPCP reactor에 연결한

후 실험 하였다.

본 실험 장치는 Fig. 8, 9와 같이 특수 설계 제작된 촉매반응기(catalysis reactor)와 연면방전(Surface discharge induced Plasma Chemical Process, SPCP) 반응기(reactor)를 방전시켜 발생하는 Plasma를 이용한 분해결과와 촉매 반응기를 첨가하지 않고 실험했을 때와의 비교를 통해 분해제거율을 구하고 생성물의 분석을 통하여 최적의 공정변수와 최고의 분해제거율을 얻고자 하는 것이다.

2.1.1 Plasma에 의한 분해실험 장치

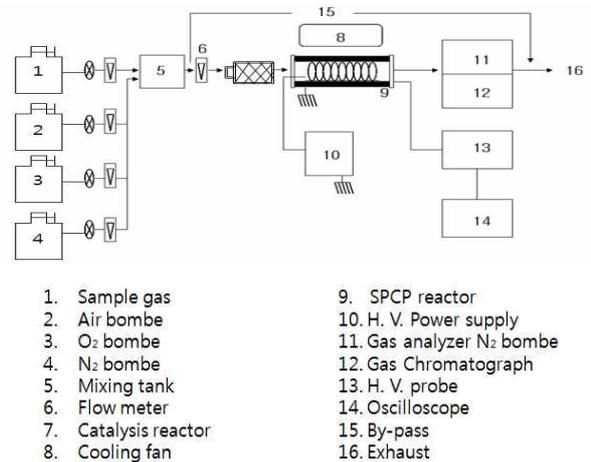


Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Plasma 방전에 의한 유해가스를 분해하기 위한 장치의 개략도를 Figure. 6에 나타내었다. 시료가스(NOx) 기준가스는 유량계를 통하여 mixing tank로 도입되어 혼합된 다음 reactor로 주입된다. 이 때 모든 가스의 수송은 내부식성이 좋은 직경 10mm의 테프론 관을 이용하였다. 반응기는 코일형 SPCP reactor를 이용하였고 발열 reactor에 의한 reactor의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각 팬을 설치하였다.

방전에 필요한 전력은 High Voltage Power Supply(SIS electronics co, SHP6501)를 사용하여 전압 범위에서 실험하였다. 분해가스는 NOx, SOx 분석기(Ecom-AC, Germany)를 사용하여 NO, NO2 를 사용하여 분석하였다.

시료가스의 분해 시 전압과 주파수는 고전압을 직접 측정할 수 없기 때문에 1,000 : 1로 전압을 낮추어 측정하기 위하여 Probe(PR30 AC/DC, England)를 사용하였고, Oscilloscope(Hewlett Packard model 54601A, 500MHz)와 기록계를 사용하여 측정 확인하였다.

3. 실험방법

본 실험에 사용된 표준시료 가스는 1,500ppm NO (N₂ base 99.95%), 1,500ppm NO₂(N₂ base 99.95%)를 사용하여 실험하였다. 시료가스의 유량은 N₂, O₂, 공기, 시료가스 및 첨가 가스(CH₄)를 실험조건에 따라 유량계에 부착된 조절밸브로 조절하면서 혼합탱크에서 혼합하였으며 혼합 한 가스는 유량계를 사용하여 100, 200, 300ml/min로 유량을 변화시키면서 reactor에 주입하였고, 이 때 가스 분석기로 NO_x의 농도를 측정 하였다. 가스의 농도는 순도 99.95%의 N₂가스와 표준시료 가스를 혼합하여 초기 농도 100, 200, 300 ppm으로 하여 정상상태가 되도록 3~5분간 유지시킨 후 분해하였다.

실험은 상온, 대기압 하에서 하였으며 시료가스가 누출되는 것을 방지하기 위하여 테프론으로 SPCP reactor를 밀봉하였으며 초기농도는 정상상태에 도달한 후 분석기로 확인한 후 분해하였다. 입력전력은 Oscilloscope와 기록기로 파형을 관찰하면서 전압과 전류를 상승시켜 반응기내에서 Plasma가 확실하게 발생하는 최저 전력부터 증가시키면서 실험을 하였다. 입력 전력을 일정하게 유지시킨 후에 reactor를 통과한 시료 가스 속에 있는 NO, NO₂의 농도가 거의 변화되지 않을 때의 측정값을 기록하였다.

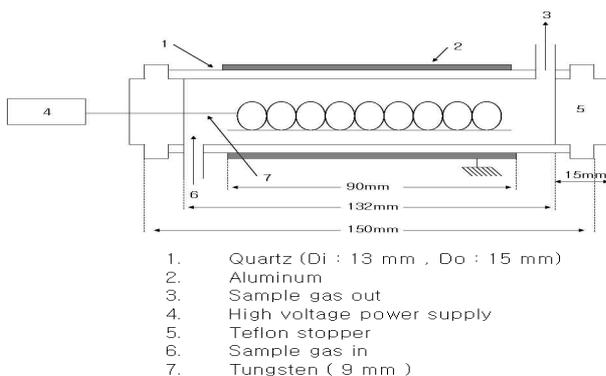


Figure 2. Schematic diagram of discharge plasma reactor

실험변수는 표준가스의 유량과 농도, 주파수 변화 이외에 전극의 재질(W, Cu, Al), 전극의 굵기(1, 2, 3 mm), 전극코일의 감은 횟수(7, 9, 11 회), 기준가스(N₂, O₂, air), 첨가물질(CH₄)등을 변화시켰고, 이들 실험변수의 기준 값은 시료가스 300ppm의 농도, 10kHz의 주파수, 200ml/min의 유량, W를 전극재질, 1mm의 전극 굵기, 7회의 감은횟수 및 기준가스를 N₂로 하였다. 이들 실험변수 중 기준 값을 고정하고 한 개의 변수만을 변화시키면서 실험을 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 NO의 분해

본 실험은 2가지 형태로 구분하여 NO가스의 분해실험을 하였다. 먼저 catalysis reactor를 사용하지 않은 상태에서 NO가스의 분해실험을 하였으며, 그 분석결과를 가지고 CaO, CuO, TiO₂ catalysis reactor 그리고 SPCP reactor와 같이 사용하여 NO가스의 분해실험을 하였을 때의 분해제거효율 (decomposition efficiency)을 비교분석 하였다.

4.1.1 촉매의 영향

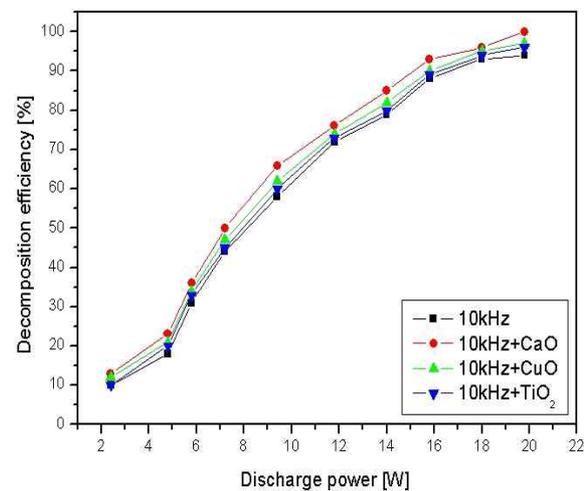


Figure 3. Effect of type of catalysis on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor

Figure. 3은 CaO, CuO, TiO₂ catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 촉매를 CaO, CuO, TiO₂로 변화시켰을 때 10kHz의 방전전력(discharge power)에 대한 NO₂가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 무촉매, CaO, CuO, TiO₂ 촉매로 실험하였을 때 각각 94.0%, 99.0%, 97.0%, 96.0%의 분해율을 보임에 따라 CaO(Calcium Oxide) 촉매를 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 보이는 것을 알 수 있었다. CaO와 NO, NO₂ 촉매반응에 의하여 CaNO₃로의 반응으로 추정된다.

4.1.2 주파수의 영향

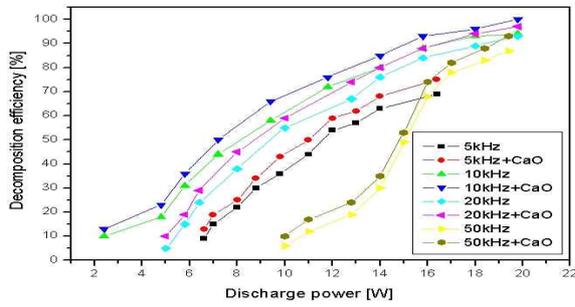


Figure 4. Effect of electric frequency on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 4는 catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate)그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 주파수(electric frequency)를 5, 10, 20, 50kHz로 변화시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해효율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다. 실험결과는 분해효율의 변화가 방전전력을 커질수록 급격하게 증가하는 경향을 보였으며 주파수를 10kHz로 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다. 본 실험범위 내에서는 주파수 10 kHz시 방전전력 19.8W에서 94.0%로 최대의 분해제거율을 나타냈으며 그리고 산화칼슘(Calcium, CaO) catalysis reactor를 첨가하여 실험을 해본 결과 주파수 10kHz와 방전전력 19.8W에서 99.0%의 최대 가스분해제거율을 나타냈다. 방전출력이 커질수록 전류가 증가하여 분해효율이 처음에는 급속히 증가하다가 18~20W의 높은 방전출력 범위에서는 서서히 증가하는 것을 알 수 있었다. 20kHz 이상에서는 주파수가 증가함에 따라 분해제거율이 감소하는 것을 알 수 있었고, 5kHz의 저주파수에서는 분해제거율이 감소하였다. 그러나 5kHz 이하의 저주파수 범위 즉, 50~800Hz에서 NO가스의 분해 연구, 60~400Hz의 범위에서 NO_x의 분해의 연구등의 저주파 영역에서의 연구 결과는 주파수의 증가에 따라 분해제거율이 증가하였다. 결과적으로 10kHz를 분기점으로 저주파수 범위에서는 주파수가 커질수록, 고주파수 범위에서는 주파수가 작을수록 분해제거율이 커지는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 주파수의 변화는 10kHz와 18~20W의 높은 전력 값에서 높은 분해제거율을 보였기 때문에 이후의 실험은 모든 전력 범위에서 안정된 분해제거율을 갖는 10kHz를 기준 주파수로 하여 실험하였다.

4.1.3 방전전력에 의한 영향

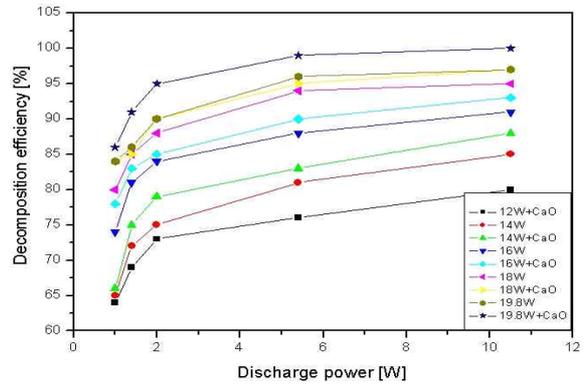


Figure 5. Effect of discharge power on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 5은 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 10 kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 체류시간(residence time)을 10.5초로 하여 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 방전전력(discharge power)이 19.8W일 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

NO 가스의 체류시간이 길수록 즉, 유량이 작을수록 분해제거율이 높게 나타났으며, 그리고 전 단계에 산화칼슘(calcium oxide)을 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

4.1.4 농도에 의한 영향

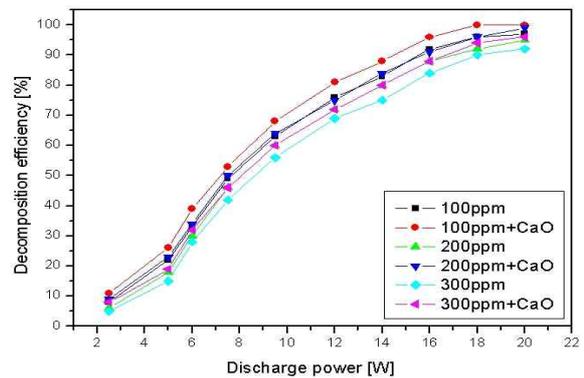


Figure 6. Effect of initial concentration of NO decomposition efficiency by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 6는 산화칼슘(CaO) Catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준 가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 초기농도(initial concentration)를 100, 200, 300으로 변화시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해 제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 초기농도(initial concentration)를 100ppm 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

초기농도(initial concentration)가 작을수록 분해제거율이 높게 나타났으며 그리고 전 단계에 산화칼슘(Calcium Oxide) catalysis reactor를 첨가한 실험의 경우에는 분해효율이 조금씩 더 높게 나타났다. 이것은 초기농도(initial concentration)가 작을수록 NO분자가 분해하는데 필요한 에너지가 커지기 때문이라고 사료 된다. 이것은 기준가스와 충돌하여 생성된 N •, O • 및 OH • 라디칼이 NO분자와 반응하거나 자유전자가 직접 NO와 충돌하여 반응 할 수 있는 확률이 커지므로 분해제거율이 높게 나타나는 것으로 사료 된다. 이것은 펄스방전 Plasma에서 초기농도 100, 150, 및 200ppm에서 NOx의 제거를 연구한 角田 등의 연구 결과와 일치하였다.

4.1.5 전극의 재질에 따른 영향

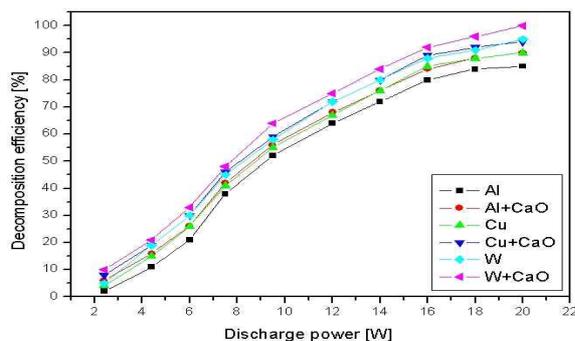


Figure 7. Effect of electrode material on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 7는 산화칼슘(CaO) Catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 전극재질

(electrode material)을 텅스텐(W), 구리(Cu), 알루미늄(Al)을 사용하였을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 전극재질(electrode material)을 텅스텐(W)으로 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

그리고 전 단계에 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율(decomposition efficiency)이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 전극재질의 전기저항이 높을수록 전극의 온도가 높아지므로 이온방전 즉, Plasma가 발생하기 쉽고 용점이 낮을수록 전극의 오염도가 커져서 다른 물질이 전극표면에 침적되어 전극의 성능이 저하되기 때문이다.

4.1.6 전극의 굵기에 의한 영향

Figure. 8은 산화칼슘(CaO) Catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 텅스텐(W)전극에서 전극의 굵기(thickness of electrode material)를 1, 2, 3mm로 변화 시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다. 실험결과는 전극의 굵기(thickness of electrode material)를 3mm의 전극을 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 보였다. 그리고 전 단계에 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다. 이것은 전극의 굵기가 굵을수록 방전을 일으키는 방전 면적이 증가하여 분해제거율이 증가하는 것으로 사료 된다.

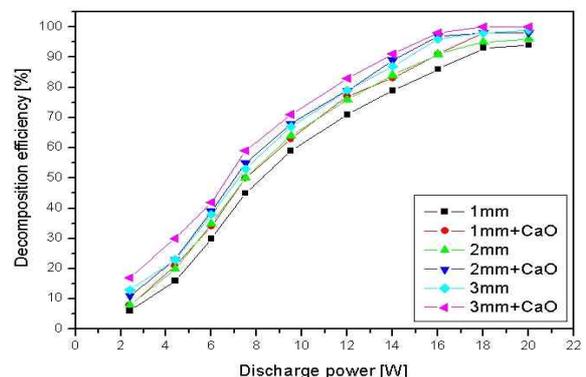


Figure 8. Effect of thickness of electrode material on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with CaO catalysis

4.1.7 전극의 감은 횟수의 영향

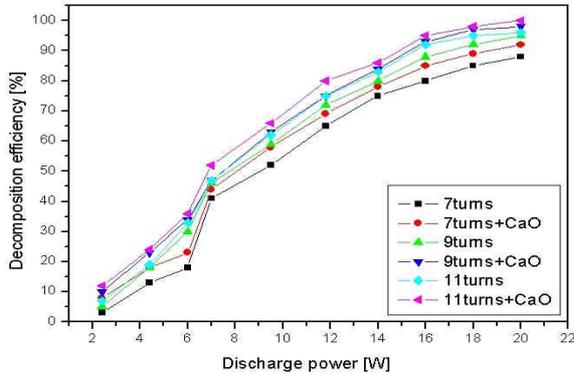


Figure 9. Effect of number of electrode turn on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 9은 산화칼슘(CaO) Catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 텡스텐(W)전극에서 전극의 감은횟수(number of electrode turn)를 7, 9, 11회로 변화 시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 전극의 감은횟수(number of electrode turn)를 11회 감았을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다. 그리고 전 단계에 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 감은 횟수가 증가할수록 방전면적이 증가하고 코일 간격이 좁아져서 에너지가 증가하므로 코일의 주위에 Plasma의 발생이 증가하기 때문으로 사료되며 이것은 Oda 등이 1,000ppm의 트리클로로에틸렌 분해에서 21과 38회로 감은횟수를 변화시켜 분해제거율을 구한 연구에서도 확인할 수 있었다.

4.1.8 기준가스 변화에 따른 영향

Figure. 10은 산화칼슘(CaO) Catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency)로 하여 실험을 하였다.

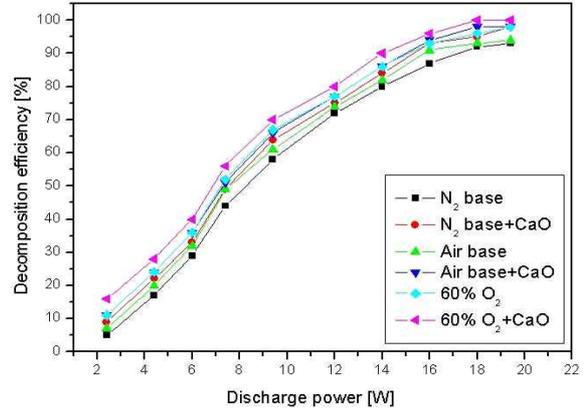


Figure 10. Effect of base on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with CaO catalysis

이때 텡스텐(W)전극에서 기준가스(base gas) N₂, 공기와 60vol.% 산소(O₂), 75vol.% 산소(O₂)로 변화시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 텡스텐(W)전극에서 60vol.% 산소(O₂)일 때 가장 높은 분해제거율을 나타냈으며, 다음으로 공기 기준가스 및 N₂기준가스의 순서로 NO가스의 분해제거율이 감소하였다. 그리고 전 단계에 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

60vol% O₂, 공기 기준가스의 순서로 분해제거율이 감소하였는데 이것은 산소분자가 많이 존재할수록 산소분자가 Plasma로부터 에너지를 받아 자유전자로 분해되고 NO와 라디칼 화학반응을 일으키므로 분해제거율이 증가하는 것으로 사료된다.

4.1.9 메탄가스 첨가에 의한 영향

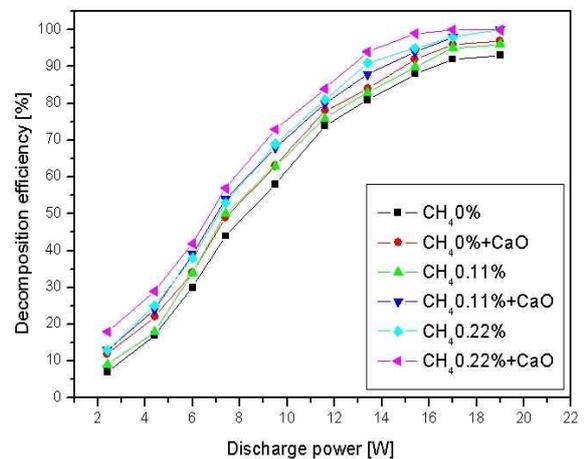


Figure 11. Effect of additive CH₄ on decomposition efficiency of NO by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 11는 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 분해제거율을 높이기 위하여 메탄(CH₄)을 0.00, 0.11, 0.22 vol.%로 첨가 하면서 방전전력(discharge power)에 대한 NO가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다. 실험결과는 메탄(CH₄)을 0.22vol.%로 첨가 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

메탄을 첨가한 양이 커질수록 분해제거율이 증가하여 15.4~19.0W의 높은 전력에서는 100%의 분해제거율을 얻을 수 있었다. 그리고 전 단계에 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가한 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

Figure. 4와 비교하면 분해제거율이 상당히 증가한 것을 알 수 있었다. 이것은 메탄분자가 CH₃ • 라디칼과 H • 라디칼로 분해되면서 이 때 생성된 H • 라디칼과 O • 라디칼이 반응하여 NO의 산화에 필요한 OH • 라디칼을 생성하므로 탄화수소의 농도가 커질수록 분해제거율이 증가한다고 사료 된다.

4.2 NO₂의 분해

본 실험은 2가지 형태로 구분하여 NO가스의 분해실험을 하였다. 먼저 산화칼슘(Calcium oxide, CaO) catalysis reactor를 사용하지 않은 상태에서 NO₂가스의 분해실험을 하였으며, 그 분석결과를 가지고 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 그리고 SPCP reactor와 같이 사용하여 NO₂가스의 분해실험을 하였을 때의 분해제거효율(decomposition efficiency)을 비교분석 하였다.

4.2.1 촉매의 영향

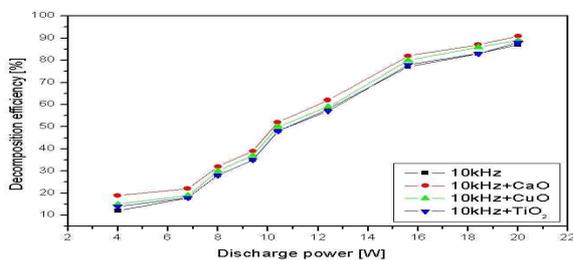


Figure 12. Effect of electric frequency on decomposition efficiency of NO₂ by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 12은 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 촉매를 CaO, CuO, TiO₂로 변화시켰을 때 10kHz의 방전전력(discharge power)에 대한 NO₂가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 각각 무촉매 87%, CaO 93%, CuO 89%, TiO₂ 88%의 분해율을 보임에 따라 CaO(Calcium Oxide) 촉매를 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 보이는 것을 알 수 있었다. CaO와 NO, NO₂ 촉매반응에 의하여 CaNO₃로의 반응으로 추정된다.

4.2.2 주파수의 영향

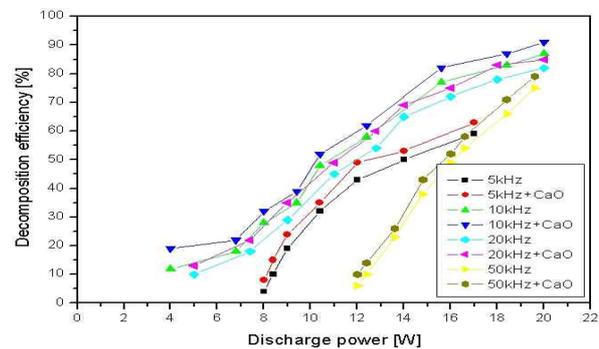


Figure 13. Effect of electric frequency on decomposition efficiency of NO₂ by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 13는 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 주파수(electric frequency)를 5, 10, 20, 50kHz로 변화시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO₂가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 주파수(electric frequency)를 10kHz로 변화시켰을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

이 경우 본 실험에서는 10kHz시 20W에서 86.0%의 가장 높은 분해제거율을 나타냈으며 NO가스보다는 10.0%정도 분해제거율이 떨어졌다. 산화칼슘(Calcium oxide, CaO) catalysis reactor를 사용하여 실험을 해본 결과 주파수 10kHz시 방전전력 20.0W에서 93.0%의 최대의 가스분해제거율을 나타냈다.

4.2.3 방전전력에 의한 영향

Figure. 14은 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N2를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 체류시간(residence time)을 1.05~10.5초로 변화시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO2가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 방전전력(discharge power)이 20.0W일 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

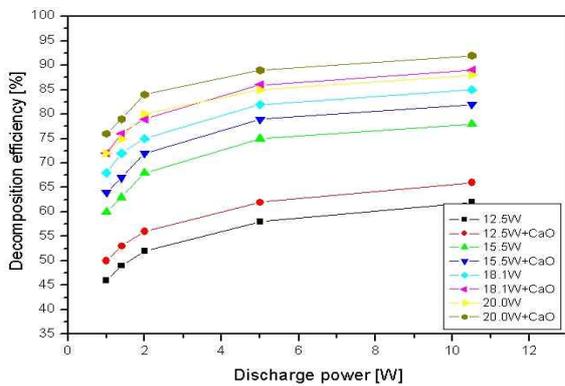


Figure 14. Effect of electric frequency on decomposition efficiency of NO2 by SPCP reactor with CaO catalysis

여기서 NO2가스의 체류시간이 길어질수록 즉, 유량이 작아질수록 분해제거율이 높게 나타났으며, 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 사용하여 실험한 경우 분해제거율이 4.0%가 더 높게 나타났다. 이는 유량이 작을수록 반응기를 통과하는 체류시간이 증가하여 기준가스와 충돌할 수 있는 충돌주파수(Ue)가 증가되어 반응에 필요한 에너지가 커지므로 라디칼이 많이 생성되어 NO2가스와 반응하여 분해제거율이 높게 나타나는 것으로 사료되며 펄스방전 Plasma에서 유량 150, 300 및 840ml/min로 변화시켜 NOx의 제거율은 입력전력과 체류시간에 의존한다는 角田의 연구결과와 일치하였다.

4.2.4 농도에 의한 영향

Figure. 15은 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N2를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다.

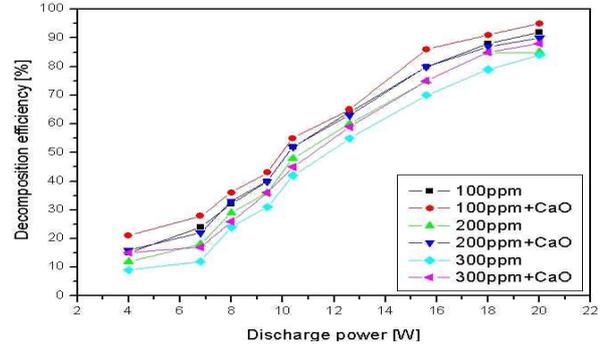


Figure 15. Effect of initial concentration of NO2 decomposition efficiency by SPCP reactor with CaO catalysis

이때 초기농도(initial concentration)를 100, 200, 300ppm으로 변화시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO2가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 초기농도(initial concentration)를 100ppm 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

초기농도(initial concentration)가 작을수록 분해제거율이 Fig. 26과 마찬가지로 S자 모양으로 높게 나타났으며 산화칼슘(CaO)catalysis reactor를 첨가하여 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다. 이것은 초기농도(initial concentration)가 작을수록 NO2분자가 분해하는데 필요한 에너지가 커지기 때문이라고 사료된다. 이것은 기준가스와 충돌하여 생성된 N •, O • 및 OH • 라디칼이 NO2분자와 반응하거나 자유전자가 직접 NO2와 충돌하여 반응할 수 있는 확률이 커지므로 분해제거율이 높게 나타나는 것으로 사료된다. 이것은 펄스방전 Plasma에서 초기농도 100, 150 및 200ppm에서 NOx의 제거를 연구한 角田의 연구결과와 일치하였다.

4.2.5 전극의 재질에 따른 영향

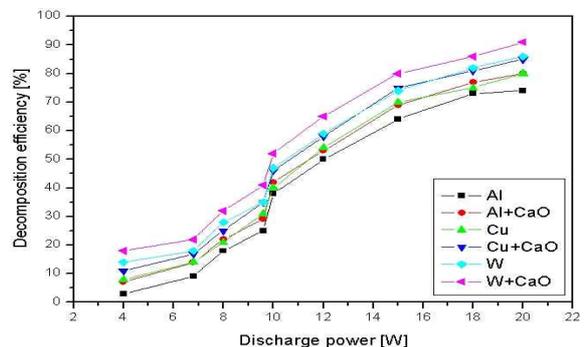


Figure 16. Effect of electrode material on decomposition efficiency of NO2 by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 16는 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 전극재질(electrode material)을 텅스텐(W), 구리(Cu), 알루미늄(Al)을 사용하였을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO₂가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과 방전전극으로 텅스텐(W) 전극을 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타내었다. 그리고 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가하여 실험 시는 분해제거율이 이것은 NO가스와 마찬가지로 전극재질의 용점과 전기저항이 높을수록 전극의 온도가 높아지므로 이온방전 즉, Plasma가 발생하기 쉽고 용점이 낮을수록 전극의 오염도가 커져서 이물질이 전극표면에 침적되어 전극의 성능이 저하되기 때문이다. 실제로 상온과 2,000K에서 전기저항을 비교하면 W(5.28, 58x10⁸ Ω·m), Al(2.65, 39x10⁸ Ω·m), 및 Cu(1.678, 33 x10⁸ Ω·m)로 Cu와 Al의 결과가 일치하지 않았다. 그러나 연면방전에서 전극재료의 flash over 전압과 같은 경향을 나타내었다. 이것은 방전을 일으키는 에너지가 높게 나타나기 때문이라고 생각되어지며 Gasparik의 연구와 일치하는 경향을 나타냈다.

4.2.6 전극의 굵기에 의한 영향

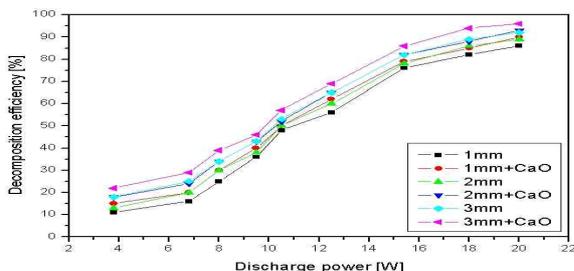


Figure 17. Effect of thickness of electrode material on decomposition efficiency of NO₂ by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 17은 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 텅스텐(W)전

극에서 전극의 굵기(thickness of electrode material)를 1, 2, 3mm로 변화 시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO₂가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다. 실험결과 텅스텐(W)전극에서 전극의 굵기(thickness of electrode material)를 3mm의 전극을 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 보였다. 그리고 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가하여 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 전극의 굵기가 굵을수록 방전을 일으키는 방전면적이 증가하여 분해제거율이 증가하는 것으로 사료 된다.

4.2.7 전극의 감은 횟수의 영향

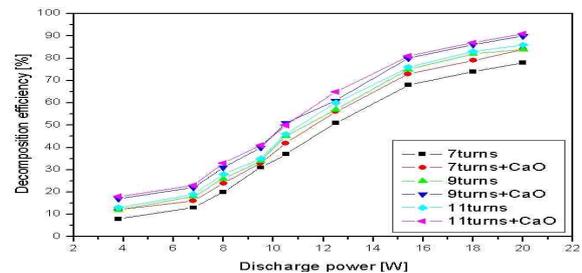


Figure 18. Effect of number of electrode turn on decomposition efficiency of NO₂ by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 18은 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N₂를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 텅스텐(W)전극에서 전극의 감은횟수(number of electrode turn)를 7, 9, 11회로 변화 시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO₂가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과 텅스텐(W)전극에서 전극의 감은횟수(number of electrode turn)를 11회 감았을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

그리고 산화칼슘(CaO)을 첨가하여 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 감은 횟수가 증가할수록 방전면적이 증가하고 코일 간격이 좁아져서 에너지가 증가하므로 코일의 주위에 Plasma 방전 전력이 증가하기 때문으로 사료되며 Oda 등의 1,000 ppm의 트리클로로에틸렌 분해에서 21과 38 회로 감은횟수를 변화시켜 분해제거율을 구한 연구에서도 확인할 수 있었다.

4.2.8 기준가스 변화에 따른 영향

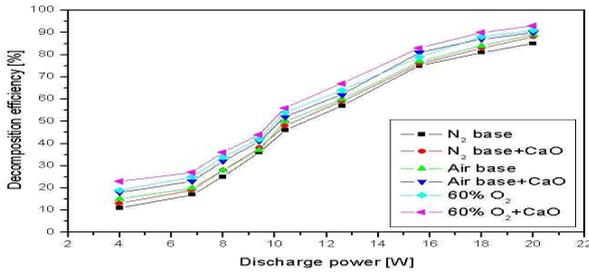


Figure 19. Effect of base on decomposition efficiency of NO2 by SPCP reactor with CaO catalysis

Figure. 19는 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency)로 하여 실험을 하였다. 이때 텅스텐(W)전극에서 기준가스(base gas) N2, 공기와 60vol.% 산소(O2)로 변화시켰을 때 방전전력(discharge power)에 대한 NO2가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다.

실험결과는 텅스텐(W)전극에서 60vol.% O2일 때 가장 높은 분해제거율을 나타냈으며, 다음으로 공기 기준가스 및 N2기준가스의 순서로 NO2가스의 분해제거율이 감소하였다. 그리고 산화칼슘(CaO)을 첨가하여 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다. 60vol.% O2, 공기의 기준가스 순서로 분해제거율이 감소하였는바 이것은 산소분자가 많이 존재할수록 산소분자가 Plasma로부터 고에너지를 받아 자유전자로 분해되고 NO2와 라디칼 화학반응을 일으키므로 분해제거율이 증가하는 것으로 사료된다.

4.2.9 메탄가스 첨가에 의한 영향

Figure. 20은 산화칼슘(CaO) catalysis reactor 및 SPCP reactor를 이용한 유해가스 분해실험으로 Figure. 1, 2에서 보는 바와 같이 Plasma에 의한 가스분해 실험 장치를 설치한 후 300ppm의 초기농도(initial concentration)와 200ml/min의 유량(flow rate), 10kHz의 주파수(electric frequency) 그리고 N2를 기준가스(base gas)로 하여 실험을 하였다. 이때 분해제거율을 높이기 위하여 메탄(CH4)을 0.00, 0.11, 0.22 vol. %로 첨가 하면서 방전전력(discharge power)에 대한 NO2가스의 분해제거율(decomposition efficiency)을 나타낸 것이다. 실험결과는 메탄(CH4)을 0.22 vol.%로 첨가 사용하였을 때 가장 높은 분해제거율을 나타내었다.

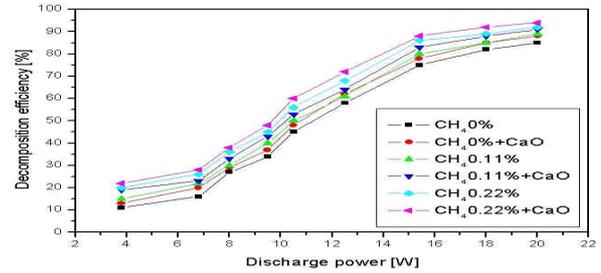


Figure 20. Effect of additive CH4 on decomposition efficiency of NO2 by SPCP reactor with CaO catalysis

메탄을 첨가한 양이 많아질수록 분해제거율이 증가하여 20W의 높은 전력에서는 98%의 분해제거율을 얻을 수 있었으나 NO에 비교하여 전력이 많이 소모되었다. 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가하여 실험 시는 분해제거율이 조금씩 더 높게 나타났다.

이것은 메탄분자가 CH3· 라디칼과 H· 라디칼로 분해되면서 이 때 생성된 H·라디칼과 O·라디칼이 반응하여 NO의 산화에 필요한 OH·라디칼을 생성하므로 탄화수소의 농도가 커질수록 분해제거율이 증가한다고 사료된다.

5. 결론 및 기대효과

본 논문은 특수 설계된 Catalysis reactor와 SPCP reactor를 방전시켜 발생하는 Plasma에 의하여 촉매로 CaO, CuO, TiO2를 사용하여 NO, NO2등의 유해가스를 농도, 유량, 주파수, 체류시간, 전극종류 및 촉매 등을 변화시켜 분해제거 실험을 수행하였으며 특히 산화칼슘(CaO) catalysis reactor를 첨가한 실험 시 분해제거율이 더 높게 나타났으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 촉매의 영향은 CaO > CuO > TiO2 순서였고, 산화칼슘(CaO) catalysis reactor와 SPCP reactor에 의한 유해가스의 분해실험에서 10kHz의 주파수와 19.8, 20.0, 19.0 및 29.6W의 소비전력에서 최대 분해제거율은 각각 96.0, 87.0, 99.0 및 94.0% 이었으며 20kHz이상의 고전압에서 주파수가 커질수록 기준가스의 전도성이 증가하여 연면을 따라 전류가 부분적으로 흐르기 때문에 분해제거율이 감소하였다. 단위전력 당 분해제거율은 NO 5.2%/W, NO2 4.4%/W로 NO의 분해제거율이 가장 좋았다.

2) 산화칼슘(CaO) catalysis reactor에 의한 SPCP reactor 전극에 의한 분해제거율은 텅스텐 전극을 사용한 경우 가장 높은 분해제거율을 나타내었고, 구리, 알루미늄 전극의 순서로 분해제거율(decomposition efficiency)이 낮아졌으며, 방전 전극 굵기에 대한 영향은

전극의 두께가 굵을수록 증가하였다.

3) 산화칼슘(CaO) catalysis reactor와 SPCP reactor에 의한 유해가스의 분해제거율은 농도 300ppm, 주파수 10kHz, 분해전력 20W일 때, NO 99.0%, NO₂ 93.0%로 SPCP reactor만 사용했을 때보다 높았다.

4) 실제 배기가스로 맞추기 위한 첨가물질의 영향은 메탄(CH₄)을 첨가할수록 분해제거율은 증가하였고, 산소의 농도를 높일수록 증가하였다.

5) 산화칼슘(CaO) catalysis reactor와 SP, CP reactor를 이용한 Plasma에 의한 유해가스분해제거에는 첨가물질에 대한 영향이 매우 크다. 따라서 본 연구에서 시행하지 못했던 코발트, 백금, 은 촉매 등 여러 가지 방법을 이용하여 분해제거율을 증가시키는 방법을 연구할 필요가 있다.

6) 본 연구에서는 산화칼슘(CaO) catalysis reactor와 SPCP reactor 방식으로 유해가스를 제거하였으나 PPCP, PDC(Plasma Driven Catalysis) 등 여러 가지 방식과 산화칼슘(CaO) catalysis reactor와 병행한 공정에 의한 분해제거율을 증가시키는 다양한 방법들을 연구할 필요가 있다.

6. 참고문헌

- [1] G. E. Vogtlin and B. M. Penetrante, " Pulsed corona discharge for removal of Nox form flue gas", NATO ASI Series, G34, Part A, pp. 187-198, 1993.
- [2] T. takahashi, K. Tada, and T. Oda, "Atmospheric Pressure Discharge Plasma Decomposition for Gaseous Air Contaminants-Trichloroethylene", 靜電氣學會講演論文集, 15a, B4, pp. 11-14, 1997.
- [3] Senichi Masuda, Hidyuki Nakao. "Control of NOx by positive and negative Pulsed Corona Discharges". IEEE Transaction on Industry Application. VOL. 26, NO. 2, pp. 374-383, 1990.
- [4] A. Mizuno, Y. Yamazaki, H. Ito, and H.Yoshida, "ac Energized Ferroelectric Pellet Bed Gas Cleaner", IEEE Trans. Ind. App. 28(3), pp. 535-540, 1992.
- [5] G. Dinelli, L. Civitano, and M. Rea, "Industrial Experiments on pulse corona simultaneous removal of NOx and SOx", IEEE Trans. Ind. Appl. 254. pp. 535-541, 1990.
- [6] K. Shimizu and T. Oda, "NOx Treatment Using Non-Thermal Plasma Catalyst and Addition of Hydrocarbons", Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 122-131, 1997.
- [7] 박성국, "Reduction and decomposition of hazardous NO_x and SO_x pollutants by discharging plasma with Titanium Oxide(TiO)", pp.50-80, 2008.
- [8] 변영철, 이기만, 고동준, 신동남 "Removal Characteristics of NOx & SOx using Absorption Catalyst based Carbon", 대한환경공학회지, Vol.33, No.1, pp. 39-46, 2011.
- [9] Hwang seung Kwon, "A study on NOx reduction characteristics of LNT catalyst with fuel injection control in light-duty diesel engine", pp. 8-27, 2012.
- [10] Geon seog son, Seung won yun, Seong Hyuk ko, Dae joong kim, Jae won song, Kwi young lee "A Study of Non-thermal Plasma Generation on a Photocatalytic Reactor Using a Ceramic Honeycomb Monolith Substrate ", 한국자동차공학회 논문집 pp. 48-54, 2002.
- [11] M. A. Lieberman and A. J. Lichten berg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing.", John Wiley & Sons, Inc, New York 1994.
- [12] R. Takahashi, Y. Kamase, and K.Yamamoto, "Decomposition of Chloro fluorocarbon Gas by a Pulsed Corona Discharge", 靜電氣學會講演論文集, 3a, C11, pp. 371-374, 1993.
- [13] K. Fujii, M. Higashi, and N. Suzuki, "Simutaneous removal of NOx, COx, SOx and soot in diesel engine exhaust", NATO ASI Series, G34, Prat B, pp. 257-280, 1993.
- [14] Ki sung kim, Han uk kim, "A Study on the Characteristics of Flames in a Valve Driven Oscillating Combustion Burner ", 한국연소학회지, Vol.9, No3, pp.130-137, 2004.
- [15] I. Hanchisuka, T. Yoshida, H. Ueno, N. Takahashi, A.Suda and M.Sugiura, "Improvement of NOx Storage-Reduction Catalyst," SAE Technical paper 2002-01-0732, 2002.
- [16] A. Ogata, K. Mizuno, S. Kushiyama, I. Tamori, and T. Yamamoto, "Behavior of Oxygen Species and Role of Ceramic Pellet-Surface in the Packed-Bed Plasma Reactor during Methane Destruction", Proc. of NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge PlasmaTechnology for Air Pollution Control, pp. 33-43, 1997.
- [17] Sang kwon sun, "A Study on Removal of NOx, SOx Using Non-thermal Plasma", 인천대학교 석사학위 논문, pp. 35-50, 1999.

[18] D. H. Lee, J. M. Oh, H. Y. Jeong, K.H. Lee and K. G. Yeo, "Spray Behavior and Distribution Characteristics in the Flow Field of Injector Used for HC-De NOx Catalyst System", Fall Conference Proceedings, KSAE, pp. 278-284, 2006.

[19] G. W. Nam, J. W. Park and J. H. Lee, "A Study of NOx Rduction System with NOx Storage Ctalyst," SAE07-S0039, pp. 258-263, 2007.

[20] R. W. Breault and C. McLarnon, "Reaction Kinetics for Flue Gas Treatment of NOx", NATO ASI Series, G34, Part B, pp. 239-259, 1993.

[21] S. Obama, E. Suzuki, K Okazaki, and A. Mizuno, "Removal of NOx With the partial discharge", 静電氣學會講演論文集, 15a, C3, pp. 9-12, 1989.

[22] K. Fujii, M. Higashi, and N. Suzuki, "Simutaneous removal of NOx, COx, SOx and soot in diesel engine exhaust", NATO ASI Series, G34, Prat B, pp. 257-280, 1993.

[23] 尹談 泰郎. "放電を利用した環境改善 -放電發生法を中心として, 静電氣學 會誌, 2(1), pp. 2-4, 1997.

[24] 角田 和彦, 清水 孝太進郎, 柱 進司, 水野 璋, "パルス放電 プラズマによるディーゼル排ガス中のNOx除去", 静電 氣學會講 演論文集, 97, 16p B5, pp. 233-236, 1997.

[25] 日本電氣學會 放電ハンドブック出版委員會編, "放電ハンドブック", 電靜氣學會, 東京 1973.

[26] T. Oda, T. Takahashi, H. Nakono, and S. Masuda, "Decomposition of Fluoro Carbon Gaseous Contaminants by SurfacePlasma Chemical Processing", IEEE Trans. Ind. pp. 787-792, 1993.

[27] A. Mizuno, Y. Yamazaki, H. Ito, and H. Yoshida, "acEnergized Ferro electric Pellet Bed Gas Cleaner", IEEE Trans. Ind. App. 28(3), pp. 535-540, 1992.

[28] R. Gasparik, M. Gasparikova, S. Ihara, S. Satoh, and C.Yamabe, "Comparison of Tungsten, Copper, Stainless and Molybdenum Used as HV Electrodes in Wire-to-Plane System Designed for NOx Treatment", Proc. fo NEDO Symp. on Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control, pp. 143-154, 1997.

[29] 화학용어사전편찬회, "화학용어사전", 2006.

저 자 소 개

박 화 용



숭실대학교 기계공학과 학사를 졸업하고 연세대학교 기계공학과에서 석사, 중앙대학교에서 박사 과정을 수료하였다. 현재는 포스코건설 이사로 재직중이며, 관심 분야는 발전분야, 환경분야 등이다.

주소: 인천시 연수구 송도동 16-6 포스코건설 주식회사

우 인 성



.명지대학교 화공과 공학박사, 현재 인천대학교 안전공학과 교수, 관심분야는 환경안전, 분진 방화 방폭 등이다.

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

김 관 중



인천대학교 안전공학과 석사, 관심분야는 화공안전, 건설안전 등이다. 현재는 인천대학교 안전공학과 대학원 교육조교로 재직중이다.

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과